

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЫШАЮЩЕГО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Основной принцип работы импульсных преобразователей электрической энергии основан на периодической, высокочастотной коммутации электронных ключей. В работе рассматривается метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ), позволяющий управлять уровнем выходных электрических переменных, за счет чего повышаются показатели энергосбережения.

Схема замещения [1] непосредственного преобразователя электрической энергии с ШИМ, выполняющего роль стабилизатора напряжения (рис. 1).

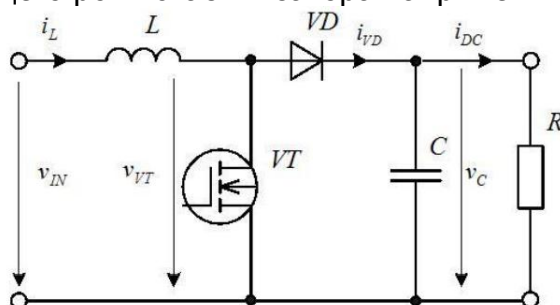


Рис. 1. Схема импульсного повышающего преобразователя напряжения

Данная схема содержит два коммутационных элемента VT1 и VD1 и два реактивных элемента L и C. Математическая модель силовой части схемы описывается двумя дифференциальными уравнениями относительно $\frac{di_L(t)}{dt}$, $\frac{dv_C(t)}{dt}$.

На рис. 2 изображены диаграммы токов на индуктивности L и диоде VD от времени.

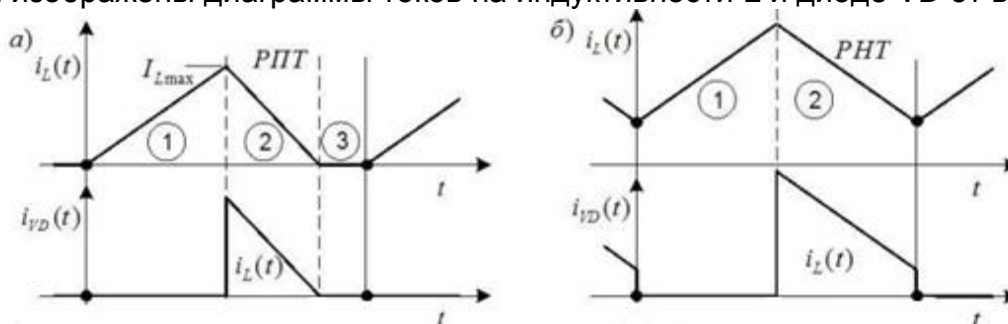


Рис. 2 Диаграммы токов индуктивности L и диоде VD от времени (символы)

На каждом интервале непрерывности внутри периода коммутации TS схема преобразователя описывается системой линейных дифференциальных уравнений [1, 2]. Рассмотрим работу преобразователя на каждом из интервалов непрерывности.

На интервале накопления энергии в индуктивности $t \in [0, t_{ON}]$ транзисторный ключ открыт, все входное $v_{IN}(t)$ напряжение приложено к индуктивности L. (параметры) Поведение схемы на интервале накопления описывается в базисе переменных состояния следующей системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{1}{L} \cdot v_{IN}(t) \\ \frac{dv_C(t)}{dt} = -\frac{1}{RC} \cdot v_C(t) \end{cases}, t \in [0, t_{ON}], \quad (1)$$

где $[i_L(t), v_C(t)]^T$ - вектор переменных состояния; $i_L(t)$ - ток входной индуктивности; $v_C(t)$ - напряжение выходной емкости; $v_{IN}(t)$ - внешнее входное напряжение.

На интервале накопления происходит линейное нарастание тока индуктивности $i_L(t)$ от нулевого уровня и накопление в ней энергии по формуле

$$i_L(t) = \frac{v_{IN}}{L} \cdot t. \quad (2)$$

При этом диод находится под обратным напряжением и закрыт, выходная цепь отделена от входной, емкость C медленно разряжается через сопротивление нагрузки R .

Во время интервала отдачи энергии индуктивностью и заряда конденсатора транзисторный ключ VT закрыт, а диод VD открыт под действием суммы входного напряжения и ЭДС самоиндукции индуктивности L . К индуктивности приложена разность входного и выходного напряжений. Ток индуктивности протекает через диод VD и заряжает выходной конденсатор. Этот процесс описывается уравнением:

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{1}{L} \cdot v_C(t) + \frac{1}{L} \cdot v_{IN}(t) \\ \frac{dv_C(t)}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_L(t) - \frac{1}{RC} \cdot v_C(t) \end{cases}, t \in [t_{ON}, t_{ON} + t_{OFF}]. \quad (3)$$

Интервал отсечки (характерен только для режима прерывистых токов), на нём ток индуктивности равен нулю, при этом не происходит ни накопление, ни передача энергии. Транзисторный ключ и диод закрыты, происходит только разряд выходной емкости. Это процесс описывается выражением (4).

$$\begin{cases} \frac{di_L(t)}{dt} = 0 \\ \frac{dv_C(t)}{dt} = -\frac{1}{RC} \cdot v_C(t) \end{cases}, t \in [t_{ON} + t_{OFF}, T], \quad i_L(t) = 0. \quad (4)$$

Управление током и выходным напряжением преобразователя при ШИМ осуществляется путем изменения длительности t_{ON} открытого состояния транзисторного ключа VT, т.е. длительности интервала накопления энергии.

Сопротивление нагрузки: $R_H = \frac{U_{вых}}{I_H} = \frac{12}{0.15} = 80 \text{ Ом}.$

Относительная длительность включения транзистора в установившемся состоянии:

$$\gamma = \frac{U_{вых} - U_{ex}}{U_{вых}} = \frac{12 - 5}{12} = 0,58$$

Индуктивность катушки: $L_{\min} = \frac{U_{ex} \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma)}{2 \cdot I_{нMax} \cdot f} = \frac{5 \cdot 0,58 \cdot (1 - 0,58)}{2 \cdot 0,15 \cdot 20000} = 0,15 \text{ мГн}.$

Ёмкость конденсатора: $C = \frac{\gamma \cdot (1 + K'_n)}{2 \cdot R_H \cdot f \cdot K'_n} = \frac{0,58 \cdot (1 + 0,03)}{2 \cdot 80 \cdot 20000 \cdot 0,03} = 6,22 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$

На рис. 3 изображена схема силовой цепи импульсного преобразователя, выполненная в программном пакете LTspise.

На рис. 4 приведены графики входного напряжения $V(n001)$, тока $I(R1)$, напряжения на нагрузке $V(n003)$ и напряжения на транзисторе $V(n004)$ при различных коэффициентах заполнения γ .

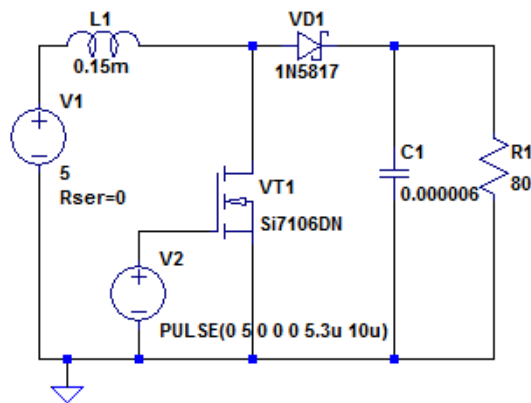
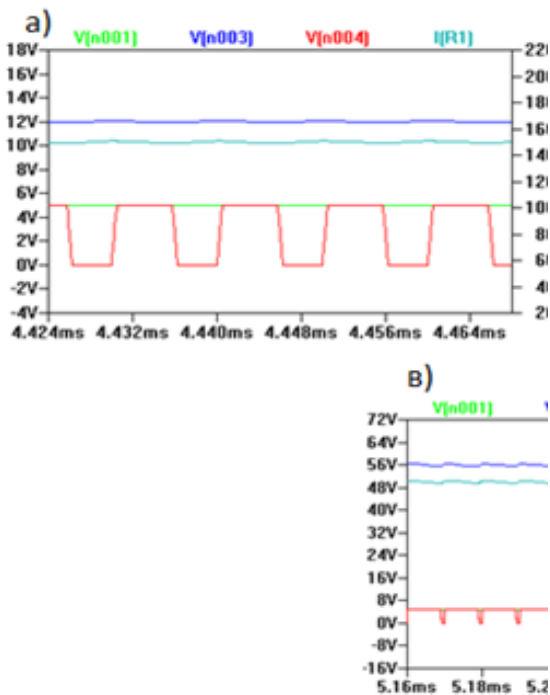


Рис.3 Силовая цепь ППН



Расчет параметров схемы произведен для выходного напряжения $U_{\text{вых}}=12$ В, расчетная скважность $\gamma = 0,58$, однако требуемое выходное напряжение реализуется в модели при гамма равном 0,53. Это объясняется внутренними сопротивлениями транзистора и диода. На рис. 5 приведена зависимость из которой видно, что при $\gamma=0,5-0,6$, наблюдается локальный максимум, позволяющий подстраивать параметры схемы под требуемые выходные характеристики.

Рис. 4. Графики входного напряжения, напряжение и тока нагрузки, напряжение транзистора при различных коэффициентах заполнения а) $\gamma = 0,53$; б) $\gamma = 0,1$; в) $\gamma = 0,9$

В таблице приведена зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от коэффициента заполнения γ .

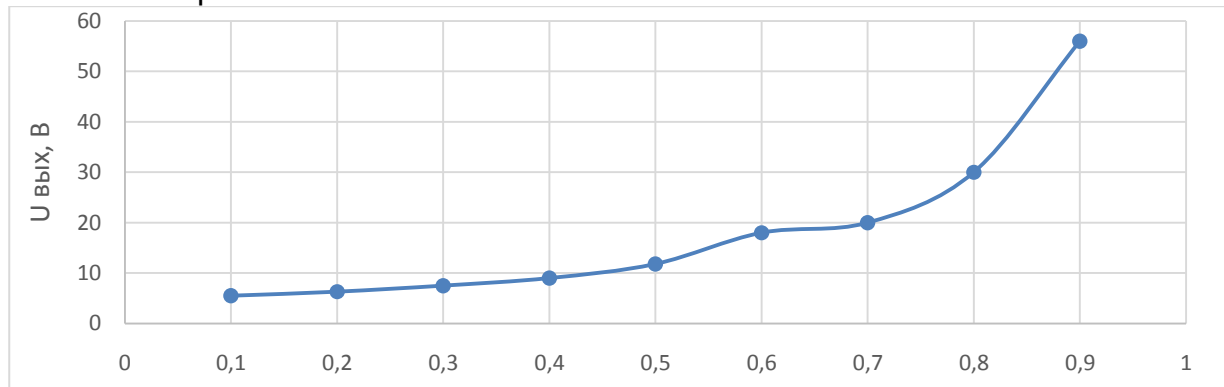


Рис. 5 Зависимость $U_{\text{вых}}$ от коэффициента заполнения γ

γ	U вых, В
0,1	5,5
0,2	6,3
0,3	7,5
0,4	9
0,5	11,8
0,6	18
0,7	20
0,8	30
0,9	56

Вывод: Разрабатываемый преобразователь будет использован в цепи предварительного повышения напряжения, снимаемого с солнечных батарей и подаваемого на вход автономного инвертора напряжения. В связи с этим особенно актуально использовать преобразователь в режиме отбора пиковой (максимальной) мощности. И поэтому система управления данной силовой цепью реализуется двухконтурная: по выходному напряжению и по току дросселя, при этом повышается показатель энергосбережения.

Список использованных источников

1. Русскин В.А., Семенов С.М., Михальченко С.Г. Исследование динамических процессов в повышающем преобразователе напряжения с жесткой и мягкой коммутацией // Промышленная энергетика ISSN 0033-1155 // 2015. №8. С.23-30.
2. Русскин В.А., Михальченко С.Г. Построение и анализ бифуркационных диаграмм динамических процессов, протекающих в повышающем преобразователе напряжения // Материалы XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015. – Омск . – 20 – 22 мая 2015 г.